

## 재료의 특징에 따른 국부화에 대한 수치해석적 연구

황두순\* · 이병섭\* · 이용성\* · 윤수진\*\* · 홍성인\*\*\*

(2000년 3월 9일 접수)

### A Study of Localization with Material Properties Using Numerical Method

D. S. Hwang, B. S. Lee, Y. S. Lee, S. J. Yoon and S. I. Hong

#### Abstract

Formation of Shear Band under the adiabatic condition is widely observed in the engineering materials during rapidly forming process for a thermally rate-dependent material. The shear band stems from evolution of a narrow region in which an intensive plastic flow occurs. The shear band often plays a role of a precursor of the ductile fracture during a forming process. The objective of this study is to investigate the localization behavior using numerical method. In this work, the implicit finite difference scheme is employed due to the ease of convergence and the numerical stability. It is noted that physical and mechanical properties of materials determine how the shear band is formed and then localized. Material properties can be characterized with inertia number, dissipation number and diffusion number. It is observed that the dimensionless numbers effect on localization. Using a parametric study, comparison was made between CRS-1018 steel with WHA (tungsten heavy alloy). The deformation behavior of material in this study include an isotropic hardening as well as thermal softening. Moreover, this study suggests that a kinematic hardening constitutive relation be required to predict a more accurate strain level at a shear band.

**Key Words** : Adiabatic Shear Band, Localization, Implicit Finite Difference Method (FDM), Kinematic Hardening

#### 1. 서론

단열전단밴드 (Adiabatic Shear Band)는 높은 변형률의 조건하에서 열과 소성 변형이 집중된 영역을 나타내

는 것으로 많은 공학적 재료에서 관찰되고 있는 현상이다. 특히, 박관관의 성형을 위한 전단하중의 경우 전단밴드의 형성이 뚜렷이 나타나는 대표적인 예라 할 수 있다. 전단밴드의 형성이 가속화 됨에 따라 밴드의 변화량

\* 충남대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 국방과학연구소  
\*\*\* 충남대학교 기계공학과

이 많고 폭이 좁은 국부화(localization) 현상이 발생하며, 이는 가공물에 치명적인 파단을 유발시킬 수 있는 현상으로 알려져 있다. 이러한 단열성 전단밴드의 형성은 철판의 관통시험에서도 흔히 관찰되며 재료가 동적 하중을 받아 소성불안정성으로 인한 소성변형이 국부적으로 집중됨으로 인해, 하중을 견딜 수 있는 능력이 급격히 저하되어 최종적인 파괴를 불러오는 중요한 원인으로 알려져 있다. 따라서, 단열전단밴드의 국부화 현상에 대한 해석과 예측을 위한 소성불안정성 (plastic instability)에 대한 연구가 필요하게 되었다.

단열전단밴드에 대한 연구는 Zener & Hollomon<sup>(1)</sup>이 최초 실험적으로 발견한 이래 Marchand & Duffy<sup>(2)</sup>가 고속 사진기와 온도 측정 장치를 이용해 전단밴드의 형성과정을 체계적으로 조사한 바 있다. 이론적 규명을 위한 수치해석적 연구로는 최근 Shawki<sup>(3)</sup>, Kobayashi, Fressengeas<sup>(4)</sup> 등에 의해 양함수 유한차분법과 유한요소법을 사용하여 조사되어진 바 있으나, 수치적 수렴성과 해의 접근속도에 있어 제한성을 가지고 있다. 국내에서는 양함수 시간 적분 유한요소법을 이용한 방법<sup>(5)</sup>과 저자에 의한 음함수 유한차분법(implicit finite difference method)을 사용하여 수렴성의 문제와 수치적 안정성의 문제를 극복하는 방법<sup>(6)</sup>이 시도되었다. 또한, 이와 관련하여 가공물의 치명적 파단에 소성불안정성이 끼치는 영향에 대해 유한요소법을 이용한 연구<sup>(7,8)</sup>도 수행되고 있다.

본 연구에서는 이러한 전단밴드의 형성과 국부화 현상에 대하여 열적 조건을 고려하여, 고속변형을 조건하에서 다결정 금속의 전단밴드 성형에 대한 물성치에 의한 영향을 연구하였다. 그리고, 재료에 따른 전단밴드의 형성과 국부화 진행의 변화를 살펴보기 위해, 각 물성치의 영향을 조사하였으며 이를 토대로 CRS-1018 강과 텅스텐(WHA : tungsten heavy alloy)의 두 가지 재료에 대해 비교하였다.

## 2. 지배방정식과 경계조건

다음 Fig. 1과 같이 높이 H를 갖는 무한 평판에서 두 개의 좌표 중 x 방향만을 고려하여, 1차원으로 가정하면 상태 변수 및 내부 상태 변수 (state and internal state variables)는 변위(x)와 시간(t)만의 함수로서 표현 가능하다. 상단에서는 속도 V의 일정한 값으로 주었으며 밑면은 고정된 것으로 가정하였다.

고려된 경계조건은 열적으로 단열(adiabatic condition)

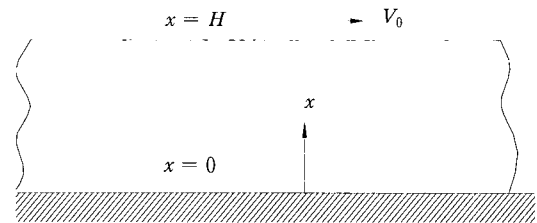
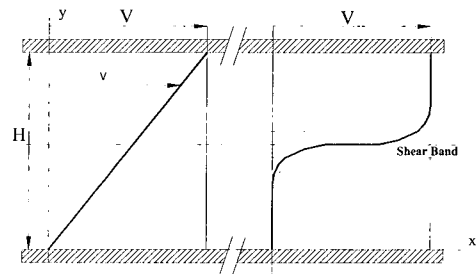


Fig. 1 Schematic representation of one-dimensional simple shear loading



(a) homogeneous (b) inhomogeneous

Fig. 2 Schematic representation of shear band kinematic

되어 있으며, Fig. 1에서 경계부분의 속도는 다음과 같이 수식적으로 표현하였다.

$$v(0, t) = 0, \quad v(1, t) = 1, \quad 0 \leq t < \infty \quad (1)$$

$$q(0, t) = q(1, t) = 0; \quad q \equiv \frac{\partial T}{\partial x}, \quad 0 \leq t < \infty \quad (2)$$

Fig. 2에서는 실험적으로 관찰된 것<sup>(2)</sup>으로서 균일변형(homogeneous deformation)과 전단밴드 형성시 속도장이 각각 비교되었다. Fig. 2(a)와 같이 초기에 전단밴드가 형성되지 않을 때는 높이에 따라 속도크기가 일정하게 증가하지만, 변형이 진행됨에 따라 전단밴드가 형성되는 경우 Fig. 2(b)와 같이 협소한 지역에 급속한 속도 변화가 발생하는 것을 보여 주고 있다.

이에 관련된 지배 방정식은 다음과 같다.

- 선형모멘트 평형  
(the conservation of linear momentum)

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad (3)$$

- 운동학적 적합조건 (constitutive equation)

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \mu \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \dot{\epsilon}^p \right] \quad (4)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}^p$  : Plastic shear strain rate

- 에너지 평형 (the conservation of energy balance)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = r_0 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + r_1 \tau \dot{\epsilon}^p \quad (5)$$

- 재료의 열적 점소성반응 (flow stress relation)

$$\tau = \phi(\dot{\epsilon}^p, \epsilon, T) \quad (6)$$

본 논문에서는 각 값들의 정성적인 변화의 비교와 계산상의 용이성을 위해 모든 변수는 다음과 같이 무차원화(dimensionlization)하여 사용되었으며, 여기서 모자(hat)표시로 표현된 것은 원래의 값을 나타낸다.

$$t = \frac{\hat{t} \hat{V}_0}{H}, \quad x = \frac{\hat{x}}{H}, \quad \tau = \frac{\hat{\tau}}{\hat{\sigma}_0}, \quad v = \frac{\hat{v}}{\hat{V}_0},$$

$$\dot{\epsilon}^p = \frac{\hat{\epsilon}^p H}{\hat{V}_0}, \quad T = \frac{\hat{T}}{\hat{T}_0}, \quad K = \frac{\hat{K} \hat{T}_0}{\hat{\sigma}_0 H \hat{V}_0},$$

$$c = \frac{\hat{c} \hat{T}_0}{\hat{\sigma}_0}, \quad \mu = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\sigma}_0}$$

여기서,  $\hat{K}$  : Thermal conductivity

$\hat{c}$  : Specific heat

$\hat{V}_0$  : Initial velocity

$\hat{T}_0$  : Initial temperature

$\hat{\sigma}_0$  : Flow stress

(5)식에서  $r_0$  와  $r_1$  은 각각 확산계수 (diffusion number)와 소산계수 (dissipation number)를 나타내고,  $\rho$  는 관성계수 (inertia number)를 나타내며, 각각 다음과 같이 무차원 값 (dimensionless group)으로 주어진다.

$$r_0 = \frac{\hat{K}}{\hat{\rho} \hat{c} H \hat{V}_0}, \quad r_1 = \frac{\beta \hat{\rho}}{\hat{\rho} \hat{c} \hat{T}_0}, \quad \rho = \frac{\hat{\rho}_0 \hat{V}_0^2}{\hat{\sigma}_0}$$

여기서,  $\hat{\rho}$  : Mass density

$\beta$  는 열로 전환되는 소성소산(plastic dissipation)량을 나타낸다. 모자(hat) 표시가 되어 있는 것은 재료의 원

물성치 값을 나타내며, 그렇지 않은 것은 무차원 값을 나타낸다.

기하학적 또는 재료의 비균질성(inhomogeneity)을 나타내기 위해, 초기 섭동(initial perturbation)이 다음과 같이 가정되었다.

$$\dot{\epsilon}^p(x, 0) = 1 \quad (7a)$$

$$\epsilon(x, 0) = \epsilon_0 \quad (7b)$$

$$T(x, 0) = 1 + \delta f(x) \quad (7c)$$

$$\tau(x, 0) = \phi(1, \epsilon_0, 1 + \delta f(x)) \quad (7d)$$

여기서,  $x$  는 무차원값으로 범위는  $0 \leq x \leq 1$  이며,  $f(x)$  는 초기 섭동 형상(perturbation profile)을 나타내기 위해 사용되었다. 본 프로그램에서 사용된 온도에 관한 초기섭동은 다음과 같은 식을 이용하여 부여하였다.

$$T(x, 0) = 1 + \delta \left[ \frac{\pi}{2d} \left( \frac{1}{2} - x \right) \right] \quad (7e)$$

$$(0.5 - d \leq x \leq 0.5 + d)$$

$$= 1 \quad (\text{기타범위})$$

주어진 섭동의 식에서  $\delta$  는 0.02로, 폭  $d$  는 0.05로 사용하였다.

### 3. 유한차분 수식화 및 수치계산

주어진 지배방정식의 유한차분 수식화에 있어서, 음함수 방법중 Simple Method를 사용하여 근사화하였으며, 다음과 같다.

$$v_j^{n+1} = v_j^n + \frac{k}{2\rho h} (\tau_{j+1}^n - \tau_{j-1}^n) \quad (8)$$

$$\tau_j^{n+1} = \tau_j^n + \frac{\mu k}{2h} (v_{j+1}^{n+1} - v_{j+1}^{n-1}) - (\mu k) \phi_j^n \quad (9)$$

$$-z T_{j+1}^{n+1} + 2(1+z) T_j^{n+1} - z T_{j-1}^{n+1} \quad (10)$$

$$= z T_{j+1}^n + 2(1-z) T_j^n + z T_{j-1}^n + 2k r_1 \tau_j^{n+1} \dot{\epsilon}_j^n$$

$$\dot{\epsilon}_j^{n+1} = \left[ \tau_j^{n+1} \left( \frac{1}{T_j^{n+1}} \right)^\nu \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_j^n} \right)^n \right]^{\frac{1}{m}} \quad (11)$$

$$\epsilon_j^{n+1} = \epsilon_j^n + k \dot{\epsilon}_j^{n+1} \quad (12)$$

(7)에서 (11)번까지의 식은 (1)부터 (4)까지의 지배방정식을 유한차분형태로 바꾼 것이다.

여기서,  $n$ 은 시간을,  $j$ 는 격자를 나타내며,  $z = (\Delta x)^2 / \Delta t$ 이다.

수치계산에 있어서 온도를 구할 때는 연립방정식을 풀어야하므로, 파탄가 방법 (Patanka Tridiagonal Method)이 사용되었다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 수치조건

재료의 특징에 따른 전단밴드의 변화를 관찰하기 위해 CRS-1018 강과 텅스텐(WHA)의 두 가지 재료에 조사되었으며, 각 물성치는 다음과 같다.

**Table 1 Material properties of CRS-1018 steel and WHA**

| 구분                    | Steel                  | WHA                     |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Thermal conductivity  | 54 W/(m °K)            | 75 W/(m °K)             |
| Mass density          | 7800 kg/m <sup>3</sup> | 17140 kg/m <sup>3</sup> |
| Specific heat         | 500 J/(kg °K)          | 139 J/(kg °K)           |
| Flow stress           | 436 MPa                | 900 MPa                 |
| Shear Elastic Modulus | 81 GPa                 | 134 GPa                 |

**Table 2 Dimensionless coefficient of CRS-1018 steel and WHA**

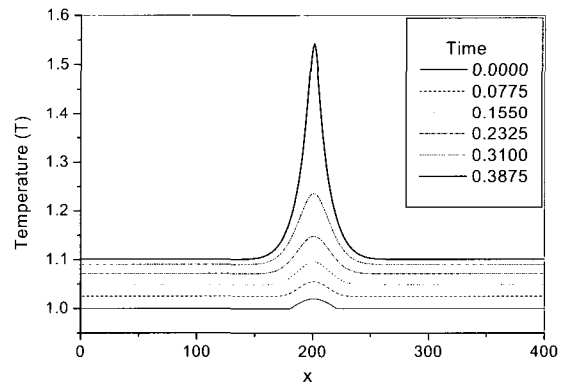
| 구분                 | Steel     | WHA       |
|--------------------|-----------|-----------|
| inertia number     | 0.000118  | 0.000119  |
| dissipation number | 0.3354    | 1.1333    |
| diffusion number   | 0.0022154 | 0.0050368 |

Table 1은 CRS-1018 강과 텅스텐에 대한 일반적인 재료성질(material properties)을 나타낸 것이고, Table 2는 앞에 제시된 일반적인 무차원 값을 계산하는 방법을 통해 구해졌다

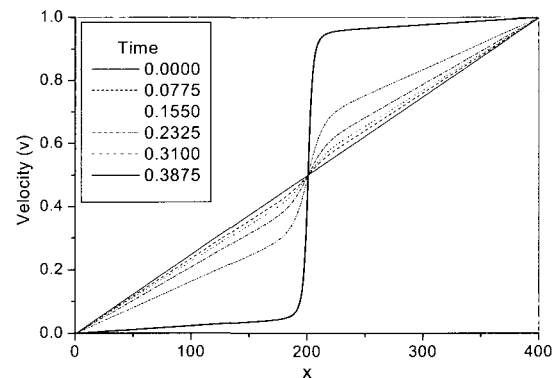
##### 4.2 전단밴드에서의 국부화의 진행

전단밴드의 국부화 생성 과정을 살펴보기 위해, CRS-1018 강에 대해 온도, 속도, 변형률 증분, 변형률에 대하여 다음과 같이 조사되었다.

Fig. 3은 시간 간격(time increment)  $\Delta t = 0.0775$ 을 두고  $t = 0.3875$ 까지 다섯 차례의 시간흐름에 따른 온도변화를 도식화한 그래프이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 국부화 현상이 발생함에 따라 전단밴드의 중심부에서 온도의 상대적 증가가 급속한 것을 알 수 있으며, 이것은 단열성 전단밴드에 있어서 중심부에서 열생성(heat generation)이 발생하고 발산의 부족으로 인한 영향으로 생각할 수 있다. 그리고, 국부화 주변의 영역에서는 중심부의 높은 온도가 주위로의 확산이 일어나는 동시에 적은 열생성이 발생하여 작은 온도상승이 일어나는 것을 살펴볼 수 있다. 그러나, 시간이 진행됨에 따라 변형은 중심부에 집중되고 상대적으로 주변에서는 줄기 때문에 열생성이 국부화된 영역에 보다 집중되며 주변에서의 온도상승률은 감소되는 경향을 나타낸다고 할 수 있다.



**Fig. 3 Variation of temperature distribution with time**



**Fig. 4 Variation of velocity distribution with time**

Fig. 4에서는 속도장의 변화를 나타내고 있는데, 시간의 경과에 따라 전단밴드내의 속도변화기울기(velocity gradient)가 급속한 증가를 보이며, 속도변화기울기가 급속히 증가된 부분이 보다 좁아지는 국부화(localization) 현상을 살펴볼 수 있다. 이는 다음의 Fig. 5에 나타난 소성변형률 증분의 국부적 집중을 가져온다.

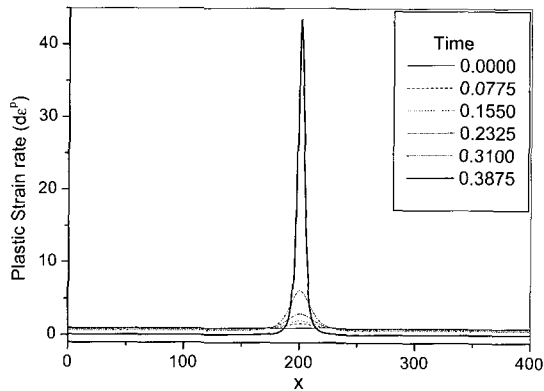


Fig. 5 Variation of plastic strain rate distribution with time

Fig. 5에서 보는 바와 같이 소성변형률 증분(plastic strain rate)의 집중도 증가되는 것을 관찰할 수 있으며, peak의 생성부위가 보다 더 축소되는 국부화 현상을 마찬가지로 살펴볼 수 있다. 전단밴드 이외의 영역에서는 소성변형률 증분의 감소를 살펴볼 수 있으며, 중심부에서 이러한 소성변형률 증분의 peak의 성장은 Fig. 6에서와 같은 소성변형률의 증가를 가져온다.

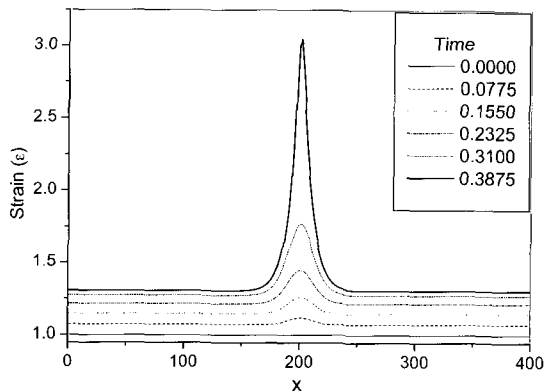


Fig. 6 Variation of strain distribution with time

위 결과로부터 열적으로 연화재료에 있어서, 단열 조건하에서 전단밴드의 경우 주위로의 열전달할 수 있는

시간의 부족과 초기 균질적 재료(homogeneous material)에서 비균질적 변형(inhomogeneous deformation)의 원인으로 인한 것으로 알려진 국부화 현상이 단열성 전단밴드에 있어서 발생하며, 이것은 상대적으로 높은 온도와 협소한 영역에서 심한 국부적 소성변형(plastic deformation)의 집중을 야기시킨다는 것을 알 수 있다.

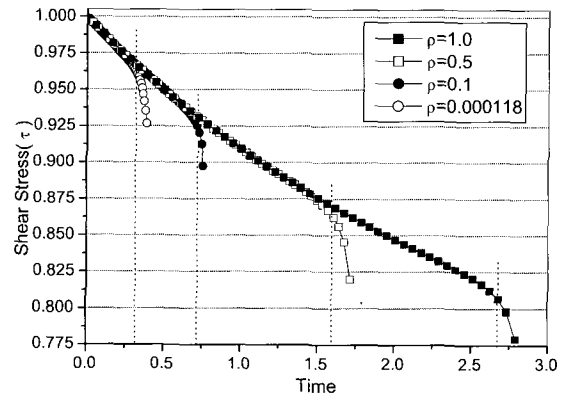


Fig. 7 Variation of shear stress for various values of the inertia number at band

### 4.3 물성치에 따른 변화

#### 4.3.1 관성계수(Inertia Number)의 영향

Fig. 7은 관성계수의 영향을 살펴보기 위해, 다른 무차원 값을 고정시키고  $\rho_0$ 를 CRS-1018 steel의 관성계수 값인 0.000118과 다른 세 가지 값에 대해 전단밴드가 형성되는 중심부에서 시간에 대한 전단응력 변화를 살펴본 그래프이다. 응력이 국부화가 일어나는 임계값에 다다른 급격히 감소하게 되는데, 관성계수가 0.000118에 비해 1.0일 때 이러한 응력감소가 완만히 일어남을 관찰할 수 있다. 이는 관성계수가 클수록, 응력의 급격한 감소가 늦어짐을 보여주는 것이다. 즉, 관성계수가 큰 경우 국부화(localization) 현상이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 관성계수가 상대적으로 매우 큰 값인 1.0의 경우 각각 온도변화와 소성 변형률 증분의 변화를 나타낸 그래프이다. 관성계수가 작을 때 온도분포가 중심부 상승과 함께 중심부 주변에서는 일정한 비로 상승하는 것과는 달리 큰 관성계수 값에 대해 중심부 주위에서 온도 상승률이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그리고, 소성 변형률 증분의 변화에서 나타나듯이 국부화가 일어나는 부분이 상대적으로 확대되는 것을 볼 수 있다. 이것은 관성계수가 클수록 국부화의 진행은 늦어지고, 국부화를 방해하는 인자로 작용한다고 생각할 수 있다.

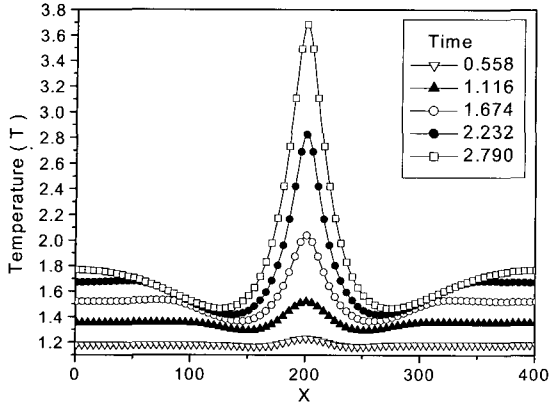


Fig. 8 Variations in the temperature with large inertia number

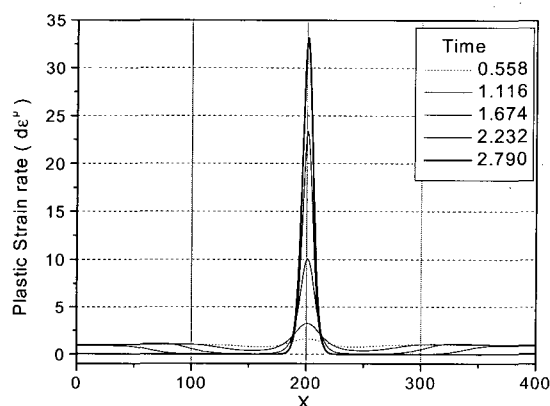


Fig. 9 Variation of plastic strain rate with large inertia number

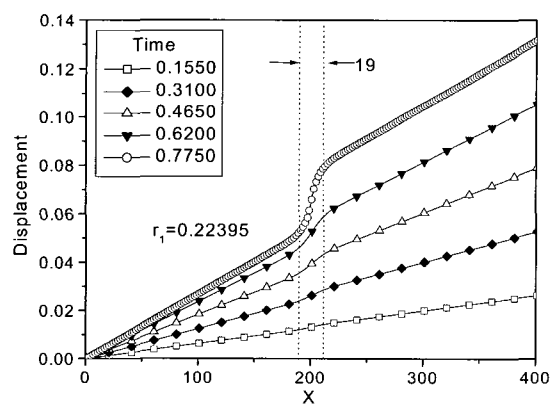


Fig. 10 Variations in the displacement profile with  $r_1$  (dissipation number) = 0.22395

4.3.2 소산계수(Dissipation Number)의 영향

Fig. 10은 소산계수가 0.22395일때 높이에 따른 변위의 변화를 보여주고 있다. 초기 일정하게 변화가 일어나던 변위가 변형이 진행함에 따라 중심부에서 급경사를 이루게 되고, 그 중심부가 축소되는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 속도 변화의 형상에 따른 것임을 알 수 있다. 급경사를 이루는 부분을 밴드폭(band width)이라고 하며, 국부화 진행의 기준으로 이용될 수 있다.

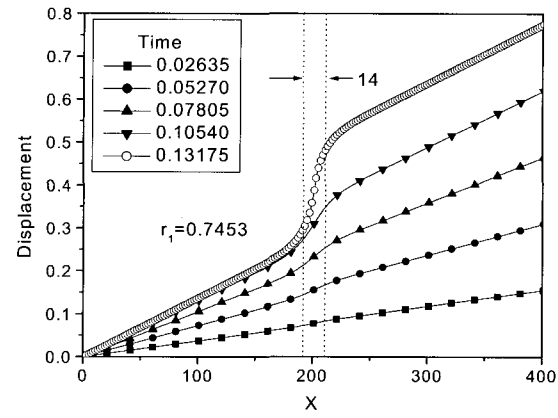


Fig. 11 Variations in the displacement profile with  $r_1$  (dissipation number) = 0.7453

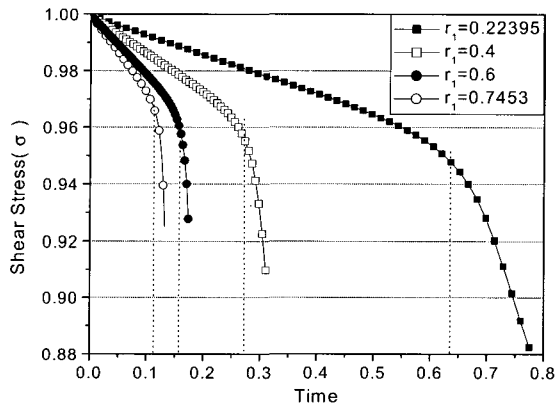


Fig. 12 Variations in the shear stress at the band for different values of the dissipation number

Fig. 10과 비교하여, Fig. 11은 소산계수가 0.22395보다 상대적으로 큰 0.7453일 때 밴드폭이 19에서 14로 줄어드는 것을 관찰할 수 있으며, 이결과로부터 소산계수가 클수록 밴드폭이 줄어든다고 판단할 수 있다.

Fig. 12는 소산계수의 영향을 알아보기 위하여 소산계

수를 0.22395일때와 다른 세 가지 값으로 변화시켰을 때 각각에 대한 시간에 따른 전단응력 변화를 나타낸 것으로, 소산계수가 클수록 응력 감소가 더욱 빨리 일어남을 살펴볼 수 있다. 이는 전단밴드의 형성과 국부화가 보다 적은 시간에 진전됨을 보여주는 것이다. 또한 보다 큰 소산계수는 전단밴드에서 국부화가 더욱 빨리 발전시키는 원인이 될 수 있는 단위 시간당 열에너지 생성(heat generation)에 기인한다고 할 수 있다.

#### 4.3.3 확산계수(Diffusion Number)의 영향

Fig. 13 은 CRS-1018 강의 확산계수값인 0.0022154일 때, 국부화가 일어나기 전과 후의 열유동의 변화를 보여주고 있는데, 국부화가 일어난 후 열유동(heat flux)이 중심부에 더욱 집중되는 것을 확인할 수 있다.

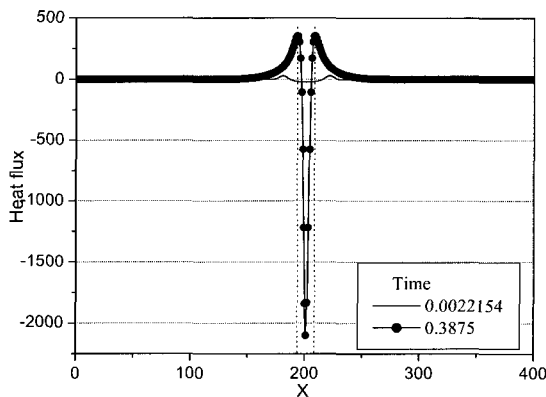


Fig. 13 Heat flux distribution of  $r_0$  (diffusion number) = 0.0022154

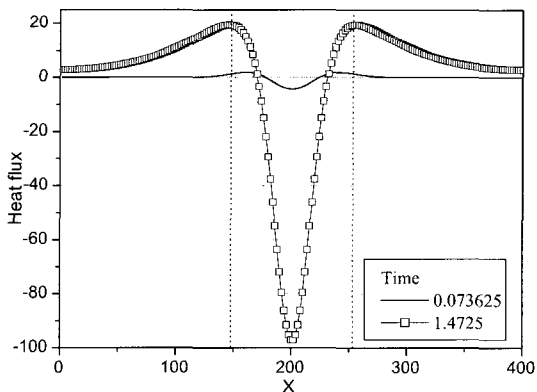


Fig. 14 Heat flux distribution of  $r_0$  (diffusion number)=0.02

Fig. 14 는 상대적으로 큰 0.02에 대해 소성변형을 집중 현상의 진행에 따른 열유동의 변화를 관찰한 것인데, 앞의 결과와 대조적으로 열유동의 영역이 오히려 확대되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 작은 확산계수가 국부화의 빠른 진전과 응력의 급격한 감소를 초래한다는 것을 보여준다. 중심부의 바깥쪽에서는 작은 비율로 열전도에 의해 온도상승이 일어난다. 이는 큰 확산계수는 국부적으로 생성된 열이 전단밴드 밖으로 보다 빠른 비율로 전도될 수 있음을 보여주는 것으로 국부화의 진행을 감소시킬 수 것으로 생각할 수 있다. 그리고, 밴드주위의 영역에서는 밴드를 중심으로 보다 넓은 영역에서 보다 높은 온도상승이 일어남을 알 수 있다.

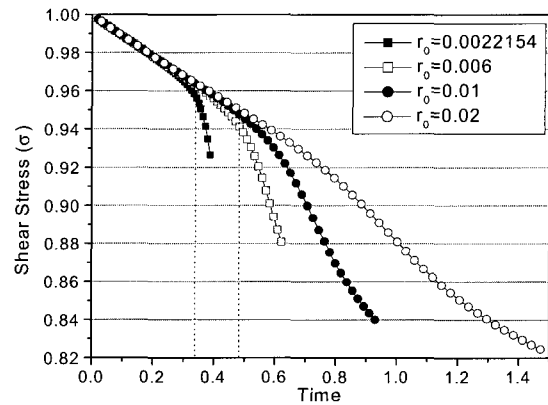


Fig. 15 Variations in the band stresses for various values of the diffusion number

Fig. 15 는 위 네 가지 확산계수에 대한 중심부에서 전단응력 변화를 도식한 것인데, 확산계수가 0.02일 때 완만한 응력감소를 나타내는 반면, 0.0022154일 때 급격한 응력감소를 살펴볼 수 있다. 이것은 열적연화(thermal softening)에 의해 국부화가 일어나고 응력의 급격한 감소와 함께 변형률이 급격히 커지는 것이라고 생각할 수 있다.

앞에 제시된 물성치에 따른 영향은 CRS-1018강과 WHA에 대한 상대비교를 나타내는 Fig. 16 과 Fig.17로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

위의 두 재료에서 관성계수의 차이는 매우 작으므로 국부화의 진행에 큰 영향을 주지 않으며, 확산계수가 상대적으로 더 큰 WHA가 다른 물성치의 영향이 같다면 steel에 비해 국부화의 진행이 늦게 시작함을 예측할 수 있다. 그러나, WHA가 확산계수에 비해 소산계수가 상대적으로 매우 큰 것을 고려하면, 확산계수의 영향보다 소산계수의 영향이 지배적이어서 steel에 비해 국부화의

진행이 빨리 시작되는 것을 예측할 수 있으며, Fig. 16과 Fig. 17의 두 가지 재료에 대한 중심부에서 온도와 변형률 증분의 변화를 통해 검증될 수 있다.

이를 통해 밀도, 탄성계수, 열용량 등 재료 특성과 경계조건으로부터 얻을 수 있는 대표값인 관성계수, 확산계수, 소산계수의 비교를 통해 다른 조건과 재료에서 전단밴드의 형성과 국부화의 진행을 예측할 수 있다.

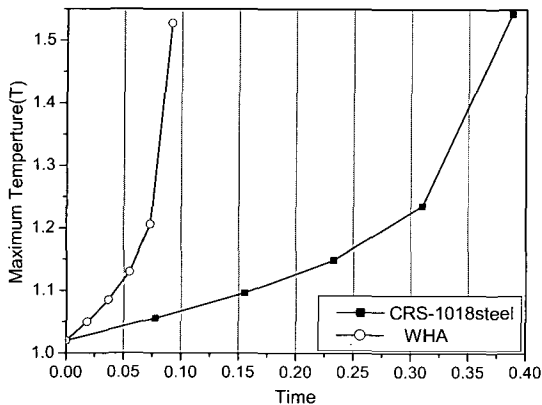


Fig. 16 Variations in the max. temperature with time

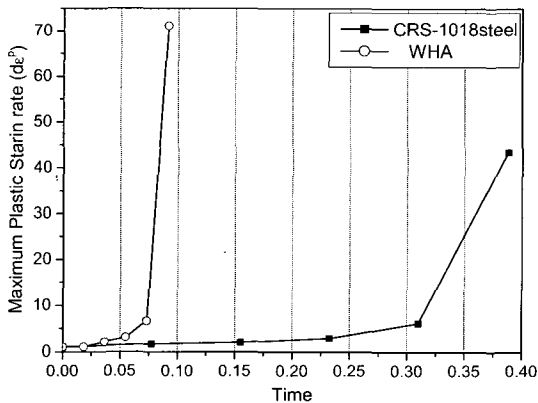


Fig. 17 Variations in the max. plastic strain rate with time

## 5. 결론

전단하중에 대해 음함수 유한차분법을 이용하여 열적으로 민감한 재료를 고속변형률의 변형 조건하에서 소성 변형 집중 거동을 조사한 결과, 시간이 지남에 따라 국부화 현상이 발생하고 전단밴드의 형성이 더욱 가속화되어 매우 협소한 지역에 높은 온도와 소성변형률을 수반하는 소성불안정성이 발견되었으며, 전단밴드 외부로 열

전도되는 시간의 부족으로 인해 국부적으로 소성유동의 집중을 야기시키는 단열전단밴드의 형성을 밝혀내었다.

단열전단밴드 해석시 기존 방법의 경우 시간에 따라 수렴 특성과 수치적 안정성에 영향을 받아 고속변형률을 수반한 문제의 경우 제약받았으나, 이를 해결할 수 있는 음함수 유한차분법을 이용한 해석방법을 개발함으로써 해의 수렴성과 수치적 안정성이 확보될 수 있었고 또한, 1차원 거동 해석만으로도 단열전단밴드의 특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

재료의 특성을 관성계수, 소산계수, 확산계수로 정리해서 나타내어 이것의 비교를 통해 물성치의 변화에 따른 전단밴드의 국부화가 다르게 일어남을 확인하였고, 다음과 같은 물성치에 따른 변화에 대한 결과를 얻었다.

- (1) 관성계수의 증가는 국부화 현상의 감소를 가져온다.
- (2) 소산계수의 증가는 전단밴드내의 열생성으로 인한 국부화 증가를 가져온다.

(3) 확산계수의 증가는 중심부에서의 온도집중을 방하여 국부화 현상의 감소를 가져온다.

(4) CRS-1018 Steel과 WHA를 비교해 볼 때, 상대적으로 소산계수가 매우 큰 WHA에서 전단밴드의 빠른 국부화 진행을 살펴 볼 수 있었으며, 이것은 상기의 결과가 타당함을 보여주는 것이라고 생각할 수 있다.

위 결과로부터 고속의 소성가공이나 절편의 관통시 재료와 조건이 선정되면 재료의 물성치로부터 단열전단밴드의 국부화 진전을 예측할 수 있으며, 이에 대한 주요 인자의 영향을 상대적으로 비교될 수 있다.

그러나, 등방성 구성방정식을 적용하는 경우, 전단밴드에 대한 국부화를 과대평가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있으므로<sup>(10-12)</sup>, 추후의 연구과제로 이동경화 구성방정식(kinematic constitutive equation)을 적용하고 소성스핀(plastic spin)을 고려한 해석이 이루어져야 할 것이다.

## 참고 문헌

- (1) C. Zener and J.H. Hollomon, 1944, "Effect of strain rate upon plastic flow of steel", J.appl.Phys. Vol.15, pp.22~32.
- (2) A. Marchand and J. Duffy, 1988, "An Experimental Study of the Formation Process of Adiabatic Shear Bands in A Structural Steel", J. Mech. Phys. Solids, Vol.36, No.3, pp.251~283.
- (3) H.P.Chelukuri and T.G.Shawki, 1995, "An Energy Based Localization Theory : 1.Basic Framework,



2. Effects of the Diffusion, Inertia and Dissipation numbers", *Int.J. Plasticity*, pp.15~40, pp.41~64.
- (4) C.Fressengeas, 1989, "Adiabatic Shear Morphology at Very High Strain Rates", *Int.J. Impact Eng.* Vol.8. No.2, pp.141~157.
- (5) 정동택, 유요한, 1994, "4340 강의 단열 전단 밴드 생성에 대한 유한요소 해석 및 실험적 고찰", *대한기계학회논문집*, 18권 5호, pp.1134~1143.
- (6) 황두순, 이병섭, 윤수진, 홍성인, 1999, "단열전단밴드의 국부화 진행에 대한 수치해석적 연구", *한국소성가공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집*, pp.225~228
- (7) 김원수, 이병섭, 황두순, 홍성인, 1999, "업셋 단조의 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, 제 8권 제 4호, pp.393~398.
- (8) 이병섭, 황두순, 윤수진, 홍성인, 1999, "이동 경화를 고려한 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구", *한국소성가공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집*, pp.98~101.
- (9) A.M.Merzer, 1982, "Modeling of Adiabatic Shear Band Development from Small Imperfections", *J.Mech.Phys.Solids* Vol.30, No.2, pp.323~338.
- (10) R.B.Pecherski, 1988, "The plastic spin concept and the theory of finite plastic deformation with induced anisotropy", *Arch.Mech.*, Vol.40, pp.807~818.
- (11) Y.F.Dafalis, 1983, "Corotational Rates for Kinematic Hardening at Large Plastic Deformation", *J.App.Mech.*, Vol.50, pp.561~565.
- (12) J.E.Paulun and R.Pecherski, 1987, "On the Application of the Plastic Spin Concept for the Description of Anisotropic Hardening in Finite Deformation Plasticity", *Int.J. Plasticity*, Vol.3, pp.303~314.